

# 多孔質体における気液二相流とその物質移動への影響

著者	芳賀 大輔
号	2593
発行年	2000
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/7866">http://hdl.handle.net/10097/7866</a>

氏 名	芳 賀 大 輔
授 与 学 位	博士（工学）
学 位 授 与 年 月 日	平成 13 年 3 月 26 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項
研究科，専攻の名称	東北大学大学院工学研究科（博士課程）地球工学専攻
学 位 論 文 題 目	多孔質体における気液二相流とその物質移動への影響
指 導 教 官	東北大学教授 千田 侑
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 千田 侑 東北大学教授 洪 承燮 東北大学教授 林 一夫 東北大学助教授 新堀 雄一

## 論 文 内 容 要 旨

多孔質体中の気液二相流における物質の移動現象は、地下帯水層や地熱貯留層などの地下における様々な工学的諸問題に関係するものである。地下帯水層では、近年、各地各様の地下帯水層の汚染が明らかになり、大きな社会問題となってきた。その土壌修復のために浄化法を適用する場合、地下における汚染物質の挙動について詳しく知る必要がある。特に、現位置バイオレメディエーション、真空抽出法あるいはエアスパーキング法などの浄化法を適用する際には土壌通気が必要であり、気相および液相の混在した不飽和層での汚染物質の移動に関する知見は有用である。加えて、汚染修復技術を施行するためには、帯水層の汚染状況の調査や汚染物質の広がり方を事前に知っておく必要がある。したがって、多孔質体中気液二相流における物質移動現象の移動機構の解明およびその定量的評価をすることは極めて重要であると考えられる。

本研究では、多孔質体中気液二相流における着目物質の移動挙動に関しての検討を行うことを目的とする。すなわち、まず不飽和層における流体混合を定量的に評価するために、充填層を用いたトレーサ試験を行う。さらに、実験により得られた応答結果を移流拡散モデルにより解析し、流体混合の強さを表わす混合拡散係数を算出する。その際、移流拡散方程式に基づくモデルが用いられるが、その数値計算の際の差分法によって生じる移流項の数値拡散を軽減するために高精度の上流差分法が必要となることを示す。また、従来用いられてきた移流拡散モデルおよびMIM(Mobile Immobile Water)モデルでは実験結果を表わし得ない流動条件があることを示し、その要因をモデルが平均滞在時間を十分に表現していないためであることを明らかにする。さらに、この実験結果を説明するための新たな数学モデルを作成する。

### 第 1 章 緒論

第 1 章では、本研究を始めるに至った社会的背景ならびに本研究の目的を述べ、本研究に関する既往の研究成果および研究例を取り挙げ、これまでこの多孔質層体中気液二相流に関する問題点および不足点を検討した。また、本研究の位置付け、目的および主な内容などについて述べた。

### 第 2 章 移流項への高精度上流差分法の適用

第 2 章では、移流拡散方程式における移流項を差分法によって離散化する際に生じる数値拡散の影響を軽減す

るために高精度上流差分法を適用しその必要性を示した。また、その適用例として、反応器におけるトレーサ試験の解析についての結果について述べた。

まず、移流拡散モデルにおいて、高次精度の上流差分法の適用を試みた。一次精度、二次精度および三次精度の上流差分法における誤差解析をし、誤差項が数値分散として結果に現れることを示した。このことにより、本試験条件に一次精度の上流差分法を用いた場合、数値分散が拡散項におよぼす影響を十分小さくするためには  $10^{-4}$  以下程度にしなければならないことが分かった。また、移流拡散モデルの解析解と、上流差分法の数値計算結果を比較することにより、物質の移動において流れが支配的な場合には特に高精度の上流差分法が必要であることを示し、三次精度の上流差分法の有効性を明らかにした。三次精度の上流差分法を適用し、反応器におけるトレーサ試験の解析を行った。これにより反応器内において混合の程度が大きく異なる場合においても数値計算が可能となりトレーサ試験結果をよく表すことを示した。

### 第 3 章 トレーサ試験による多孔質体における流体混合の検討

第 3 章では、多孔質体にいくつかの流動状態を作成してトレーサ試験を行うことにより、物質の流体混合に及ぼす流動状態の影響を評価した。混合拡散係数は、トレーサ試験結果と移流拡散モデルによる計算結果を比較することにより評価した。

充填層の流動条件を液相単相流、不飽和液相単相流および気液二相流としてトレーサ試験をそれぞれ行い、それらの結果を比較した結果、この流動状態の順に混合の程度が強くなることが分かった。これは、不飽和液相単相流については、残留ガスが粒子と同様な形で存在することにより屈曲度が増したため混合が強くなると考えられる。また、二相流については液相の流動が複雑になることによる効果と、液体の流れが非常に遅く、この淀んだ部分により生じる物質移動が遅延効果として働き、混合が促進されたためと考えられる。さらに、移流拡散モデルを用いてトレーサ試験結果を解析することにより混合拡散係数を各試験条件において求めた。その結果、同一粒子径あるいは同一流動条件においては飽和率の減少とともに混合拡散係数が大きくなるが、不飽和単相流と気液二相流の間には異なる傾向が見られた。これは前述したように、それぞれの流動状態において混合を強める要因が異なるためである。充填粒子の粒子径が 0.2cm で飽和率が比較的高い場合に、気体は小さい粒子径を用いた充填層内に見られる連続な流路を形成せず、流路が非定常に変動するように流れる。この流動条件を含めて、各流動状態による流体混合の影響を検討したが、その時間的な気体流路の変動による効果は小さい。

ここで、トレーサ試験結果と数値計算結果を比較する際に時間対濃度の関係での比較をした場合には、実験によるトレーサ応答波形は計算によるものよりもやや早い時間に応答が現れる相違点が見られた。この傾向は、液相の飽和率が低い場合に顕著となる。本章では、正規化時間対正規化濃度の関係で実験および計算による応答を比較し、混合拡散係数を評価した。

### 第 4 章 物質移動における平均滞在時間に関する考察

第 4 章では、前章のトレーサ試験結果から平均滞在時間を求め、その値は飽和単相流では空間時間とほぼ一致するが、気液二相流については空間時間より短くなることを示した。この傾向は飽和率の減少とともに顕著となる。

気液二相流における実験結果について、液相飽和率が低く、充填粒子径 が小さい場合には既存のモデル(移流拡散モデルおよび MIM モデル)では説明できないことを示し、この要因が実験とモデルの平均滞在時間の違いによるものと考え、MIM モデルの平均滞在時間を解析的に求めることにより実験結果から求まる平均滞在時間との比較を行った。

MIM モデルの基礎方程式を用いてラプラス変換によりいくつかの境界条件において平均滞在時間を解析的に求めた。その結果、MIM モデルの平均滞在時間は、本実験系での境界条件では MIM モデルにおけるパラメータによらず液相の空間時間に一致することを示した。また、他の境界条件についてもペクレ数が 100 程度であればほぼ 1 になることが分かった。

## 第 5 章 液相飽和率の局所的な分布が物質の移動に及ぼす影響

第 5 章では、多孔質体における飽和率の局所的な不均一性を考慮したモデルを作成した。実験において平均滞在時間が空間時間よりも短くなるという結果を説明するために、物質の移動に関与しない液相が分布すると仮定した。MIM モデルでは説明できなかった実験結果と比較することにより作成したモデルの妥当性を示した。

提案した数学モデルでは、液相の飽和率が異なる二層が局所的に存在し、それらが多孔質体中に一様に分布していると仮定した。また、各層において物質の移動に関与しない液相が存在すると考えた。これらの考えを基に基礎方程式を導き、数値計算により応答を求めた。得られた応答結果は、実験結果とよく一致し、得られたパラメータから、飽和率の低い層はほぼ流速が 0 であることが分かった。また、飽和率の低い層に関する面積割合は、粒子径と液相飽和率が小さくなるほど高くなる結果が得られた。このことは毛管力の影響が強くなるにつれて、流れがよどむ部分が増えることを意味しており妥当な結果が得られた。

## 第 6 章 結論

第 6 章では、本研究により得られた研究の成果をまとめ、本論文の結論とした。

# 論文審査結果の要旨

多孔質体中気液二相流における物質の移動機構の解明およびその定量的評価は、地下汚染問題に対する土壌修復技術や汚染物質の挙動を検討する上で重要な要素である。本論文は、多孔質充填層を用いたトレーサ試験の室内実験、並びに多孔質体中気液二相流における物質移動を表現する新たな数学モデルによる理論的検討を行ったもので、全文6章よりなる。

第1章は緒論であり、本研究の背景、既往の研究および目的を述べている。

第2章では、トレーサ試験の解析を含め多孔質体中の物質移動を解析する際によく適用される移流拡散方程式の数値計算法について検討している。移流項を上流差分法により離散化した際に現れる数値分散の影響について誤差解析をすることで差分における分割数と誤差の程度の関係について検討している。その結果、従来用いられてきた1次精度の上流差分法では数値分散の影響が無視できない程度に大きく高精度の上流差分法の必要性を指摘している。3次精度の上流差分法を適用して同様の検討をした結果、分割数を少なくした場合にも数値分散の影響は軽減できることを示した。

第3章では、ガラスビーズによる充填層を用いた気液二相流において流動状態の異なる条件下で、トレーサ試験を行い、物質の流体混合に及ぼす流動状態の影響を評価している。流体混合の程度を表す混合拡散係数の値はトレーサ試験結果と移流拡散モデルによる計算結果の比較によって求めている。移流拡散モデルを数値計算する際には、前章で検討した高精度の上流差分法を適用している。本実験範囲内において混合拡散係数は液相飽和率により整理できることを示すとともに、その相関関係は流動状態の違いによって大きく異なることを明らかにしている。これは重要な知見である。

第4章では、室内実験からトレーサの平均滞在時間が液相の空間時間よりも短い場合のあることを明らかにした。この結果は、既存の数学モデルである移流拡散モデルあるいはMIM(Mobile Immobile Water)モデル、すなわち多孔質体中に可動水と不動水が存在することを仮定したモデルによっては表しえないものである。このような、実験とモデルの平均滞在時間の相違を指摘した研究成果はこれまで見られず、新しい知見である。

第5章では、実験において平均滞在時間が液相の空間時間より短くなることを考慮した数学モデルを提案してその妥当性を検討している。すなわち、多孔質体中に液相の飽和率が異なる二層が巨視的均一性を保って分布していると仮定し、また、この二層とは別に物質移動に関与しない液相が存在すると考えて数学モデルを構築している。このモデルにより得られた結果を実験結果と比較し、よい一致を示したことから数学モデルの妥当性が得られている。ここで提案されたモデルは、気液二相流における物質の挙動を予測する上で有用なモデルと言える。

第6章は本論文で得られた成果をまとめた結論である。

以上要するに本論文は、多孔質体中気液二相流における物質移動に及ぼす流動状態の影響を検討し、混合拡散の程度を近似的に飽和率の関数として表すとともに、新たな数学モデルを提案し、既往のモデルでは表わしえない現象を説明したものである。この成果は、環境システム工学および貯留層工学の発展に寄与するところが少ない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。